

市场环境下的低电价可中断负荷的最优配置

罗运虎¹, 邢丽冬¹, 王勤¹, 刘海春¹, 孙秀娟², 王传江², 吴娜²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏省 南京市 210016;

2. 山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东省 青岛市 266510)

Optimal Configuration of Interruptible Price with Low Price in Market Environment

LUO Yun-hu¹, XING Li-dong¹, WANG Qin¹, LIU Hai-chun¹, SUN Xiu-juan², WANG Chuan-jiang², WU Na²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016,

Jiangsu Province, China; 2. Institute of Information and Electrical Engineering, Shandong University

of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong Province, China)

ABSTRACT: To improve the economy of configuring interruptible load with low price (ILL) in power system, according to the economic complement property between ILL and interruptible load with high compensation and using the idea of coordinative optimization, based on risk management a mathematical model of optimizing the configuration of ILL in market environment is built and an optimization algorithm based on the sensitivity of total compensation cost to parameters that guides the optimization direction is proposed; and the risk-decision for the optimal configuration of ILL aiming at all capacity faults is conducted. Simulation results show that either too high or too low configuration of ILL is unsuitable and an optimal configuration should exist.

KEY WORDS: interruptible load with low price; reserve configuration; coordinative optimization; risk management; electricity market

摘要: 为提高系统配置低电价可中断负荷(interruptible load with low price, ILL)的经济性, 针对 ILL 与高赔偿可中断负荷的经济互补特性, 运用协调优化理念, 从风险管理角度建立了市场环境下优化 ILL 配置的数学模型, 提出了基于代价对参数的灵敏度来指导优化方向的寻优算法, 并针对容量事故集对 ILL 的最优配置进行风险决策。仿真结果表明, ILL 的配置过高或过低都不合适, 而应存在一个最优值。

关键词: 低电价可中断负荷; 备用配置; 协调优化; 风险管理; 电力市场

0 引言

市场环境下, 发电机停运、输电网故障、负荷意外波动等容量事故场景具有高度的不确定性^[1],

随时会破坏电力生产与消费之间的实时平衡, 轻则影响电能质量, 重则破坏电力系统的物理稳定性^[2]。为此, 系统需要配置一定数量的备用容量。当系统出现各种容量事故时, 既可购买发电侧备用容量(reserve capacity of generation side, RCGS), 也可购买需求侧可中断负荷(interruptible load, IL)容量来应对, 故 RCGS 与 IL 容量都可视为系统备用容量^[3]。

配置系统备用容量时, 过少不能满足系统安全可靠要求, 过多又会不必要地降低经济性^[4-5]。作为系统备用容量的购买方, 电网公司如何从安全性与经济性协调角度配置各类备用容量, 以应对系统可能出现的各种容量事故, 已成为当前系统规划和市场运营中的重要问题之一。

由于 IL 的中断控制精度不高, 过控或欠控程度都较严重, 因此 RCGS 应该是备用市场的主体^[6], 这使得有关 RCGS 的配置问题一直受到广泛关注。通过与高赔偿可中断负荷(interruptible load with high compensation, ILH)的协调来对 RCGS 的配置量进行优化一直是目前的主要研究方向。文献[7]从购买 RCGS 的费用与此后仍面临的 ILH 停电损失之和最小的角度, 对 10 min 和 30 min 两类 RCGS 的配置进行了优化。鉴于旋转备用属于 RCGS 的一种, 文献[8]以系统安全可靠要求为机会约束, 将最优旋转备用容量配置问题归结为一个机会约束规划问题, 并基于 Monte Carlo 仿真的遗传算法对问题进行了求解。文献[9]依据微观经济学效用无差异理论和存储理论, 建立了优化 RCGS 配置量的数学模型。文献[10]针对 ILH 和 RCGS 在服务效用上的

的差异,对RCGS的配置量进行了优化。文献[11]依据备用容量支付时间的不同,将购买RCGS与ILH分别视为预防措施与紧急措施,并基于其经济互补性,通过两者的协调来优化RCGS配置量。

作为一种虚拟的备用发电容量资源,IL按照对用户的补偿方式可分为ILH与低电价可中断负荷(interruptible load with low price, ILL)两类。ILH是在事故发生且中断措施实施后才赔偿^[12-13]。为了提高IL市场竞争的充分性,文献[14]在其市场管理中引入了需求侧报价机制。ILL是在事故前通过电价打折来进行补偿^[15],但在合约规定的范围内对其实施中断时,将不再支付赔偿费用。作为一种需求侧紧急备用容量资源,特别是在应对概率高的事故时,ILL参与系统备用服务的意义非常重大。当前,普遍基于可避免成本理论来配置ILL容量,并确定可中断电价的折扣率^[16-17],即使考虑事故概率也不考虑事故的经济损失。这样既难以体现风险理念,也难以根据系统当前的容量事故场景来动态优化ILL的配置量,进而难以反映ILL市场需求与激励信息,故无法为ILL的优化配置提供决策支持。

ILL配置过高时将使得事故前为购买ILL所付出的电费损失过高,从经济性角度来讲并不合理;而过低又会使得电网公司在应对高概率严重事故时,为中断ILH所付出的停电赔偿风险过高,因而ILL的配置可以在一定停电赔偿风险水平下达到经济性最优。显然,系统安全性与ILL配置经济性的协调将具有重要的理论意义和现实意义。为此,ILL的最优配置完全可以基于风险管理观点与协调优化理念来加以优化。用最优电价打折措施的费用来反映ILL参与备用服务的经济代价,用最优高额赔偿措施的费用来反映ILH参与系统备用的经济代价,并根据事故概率计算出中断ILH所付出的停电赔偿风险值,并以两者之和作为目标函数,使ILL配置方案的电费损失与停电赔偿风险具有可比性,从而在兼顾安全性与经济性的同时,可以直接搜索到技术与经济全局最优的ILL配置方案。

本文在考虑安全性与经济性协调的前提下,从风险管理角度建立市场环境下优化ILL配置的数学模型与寻优算法,并针对容量事故集对ILL的最优配置进行风险决策。

1 事故前配置ILL所付出的电费损失

假设备用管理中心与用户组成IL备用服务市

场,前者负责IL市场的交易撮合,后者按等报价准则参与市场竞争。市场规则要求各用户在ILL市场与ILH市场分别申报线性报价函数,各市场具体竞价过程可参照发电侧^[18]。

设用户*i*在ILL市场所申报的电价折扣率为 $d_i(Q_i) = u_i + v_i Q_i$,其中 $d_i(Q_i)$ 是成交的可中断容量 Q_i (满足 $Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}$)的非下降函数; u_i 和 v_i 为其在ILL市场所申报的竞标策略(极限情况下为常数)。在时段 t_z 内,电网公司为购买 Q_i 向用户*i*少收的电费为 $C_i(Q_i) = p_0 d_i(Q_i) Q_i t_z$,其中 p_0 为正常售电价。

根据需要购买的ILL总量为 Q_t (满足 $Q_t^{\min} \leq Q_t \leq Q_t^{\max}$),电网公司以所付出的电费损失之和最小为ILL市场撮合交易的目标。该市场交易模型可表示为

$$\min \sum_{i=1}^I p_0 d_i Q_i t_z \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^I Q_i = Q_t \quad (2)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \quad (\forall i) \quad (3)$$

式中: $d = \max_i [d_i(Q_i), L, d_i(Q_i), L, d_i(Q_i)]$ 为ILL市场统一出清折扣率; I 为参与ILL市场的用户总数。

先不考虑约束式(3),依据等报价准则求解式(1)(2),可以得到

$$d = (Q_t + \sum_{i=1}^I \frac{u_i}{v_i}) / \sum_{i=1}^I \frac{1}{v_i} \quad (4)$$

$$Q_i = (d - u_i) / v_i \quad (\forall i) \quad (5)$$

然后再考虑约束式(3):若 $Q_i \leq Q_i^{\min}$ 则置 $Q_i = Q_i^{\min}$;若 $Q_i \geq Q_i^{\max}$ 则置 $Q_i = Q_i^{\max}$;再运用式(4)(5)重新计算 d 和其他ILL所分配到的可中断容量,直到完全满足式(3)为止。

在时段 t_z 内,电网公司为购买 Q_t 所付出的电费损失为

$$C_t(Q_t) = p_0 d Q_t t_z \quad (6)$$

2 事故后中断ILH所付出的停电赔偿风险

2.1 ILH的停电赔偿费用

设用户*j*在ILH市场所申报的高赔偿倍数(即单位负荷的停电代价与 p_0 的比值)为 $h_j(Q_j) = a_j + b_j Q_j$,其中 $h_j(Q_j)$ 是成交的可中断容量 Q_j (满足 $Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max}$)的非下降函数; a_j 和 b_j 为其在ILH市场上的竞标策略(极限情况下为常数)。在事故 m 的持续时间为 t_m 时,电网公司为中断 Q_j 而向用户

j 支付的停电赔偿费用为 $C_j(Q_j) = p_0 h_j(Q_j) Q_j t_m$ 。

根据事故 m 下需要中断的 ILH 总量 $Q_{h,m}$ (满足 $Q_h^{\min} \leq Q_{h,m} \leq Q_h^{\max}$)，电网公司以所支付的停电赔偿费用之和最小为 ILL 市场撮合交易的目标。该市场交易模型可表示为

$$\min \sum_{j=1}^J p_0 h_j Q_j t_m \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^J Q_j = Q_{h,m} \quad (8)$$

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max} \quad (\forall j) \quad (9)$$

式中： $h = \max[h_1(Q), L, h_j(Q), L, h_j(Q)]$ 为 ILL 市场统一出清的高赔偿倍数； J 为参与 ILL 市场的用户总数。求解各 ILL 所分配到的可中断容量的方法可参照式(4)~(5)。

一旦对容量为 $Q_{h,m}$ 的 ILH 实施停电，电网公司为此所支付的停电赔偿费用为

$$L_{d,m} = p_0 h Q_{h,m} t_m \quad (10)$$

2.2 停电赔偿风险

停电赔偿风险是指为中断 ILH 所付出的风险性成本。针对容量事故集 M ，它可表示为

$$C_h = \sum_{m=1}^M C_{h,m} = \sum_{m=1}^M q_m L_{d,m} t_m \quad (11)$$

式中： $C_{h,m}$ 为事故 m 的停电赔偿风险值； q_m 为事故 m 的发生概率。

3 数学模型

3.1 模型的建立

在满足系统安全可靠性的前提下，优化配置 ILL 的目标函数，以中断 IL 所付出的补偿总代价 C 最小为目标，其中 C 包含事故前配置 ILL 所付出的电费损失 $C_l(Q_l)$ 和为各种容量事故所承担的停电赔偿风险 C_h 。约束中包括各事故下要求切除的 IL 总量 (Q_m ，可由事故 m 来确定) 等式约束，以及各 IL 市场可中断容量总量不等式约束。市场环境下配置 ILL 的数学模型可表示为

$$\min C = C_l(Q_l) + C_h(Q_l, Q_{h,1}, L, Q_{h,m}, L, Q_{h,M}) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} Q_{h,m} = Q_m - Q_l \\ Q_l^{\min} \leq Q_l \leq Q_l^{\max} \\ Q_h^{\min} \leq Q_{h,m} \leq Q_h^{\max} \end{cases}$$

3.2 模型的求解

图 1 表示当 Q_l 增加时， C_l 单调上升。同时，

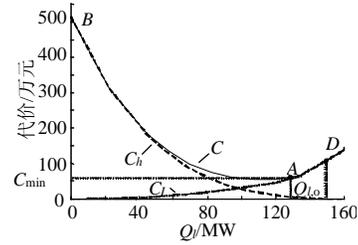


图 1 ILL 的最优配置

Fig. 1 Optimal configuration for ILL

Q_l 的增加使需要的 $Q_{h,m}$ 减少，故 C_h 单调下降，其综合影响使 C 为二阶导数为正的曲线，且具有最小值 C_{\min} ，此时所对应的 Q_l 即为最优 ILL 配置量 $Q_{l,o}$ (对应于 A 点)，图中 B (或 D) 点对应于所需要的可中断容量，它们全部来自于 ILL 市场 (或 ILL 市场)。

为加快寻优速度，可基于数值灵敏度技术搜索 $\partial C(Q_l) / \partial Q_l$ 为零值的点 ($Q_{l,o}, C_{\min}$)，即采用代价对 Q_l 的灵敏度来指导优化 Q_l 的方向。求取数值灵敏度所用的步长和收敛门限值可按精度要求而定。虽然该方法不能保证得到最优解，但能通过较少的计算量得到满意解，故比较适合工程应用。图 2 给出了发生事故 m 时搜索 ILL 最优配置量的流程框图。

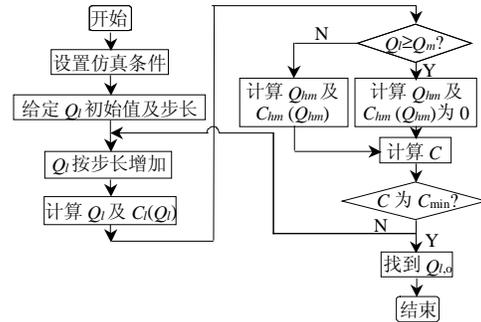


图 2 发生事故 m 时搜索最优 ILL 的流程

Fig. 2 Flowchart of searching optimal ILL for fault m

4 仿真分析

4.1 计算条件

设 p_0 为 400 元/MWh，研究时段 t_z 为 24h。用户 i 及 j 的竞标策略 u_i 、 α_j 设为 0，表 1、2 给出了各用户在 ILL 市场与 ILH 市场所申报的竞标策略 v_i 和 b_j ；表 3 给出了容量事故场景。

表 1 ILL 市场参数

Table 1 Parameters of ILL market			
用户 i	可中断容量下限/MW	可中断容量上限/MW	竞标策略 v_i
1	0	15	0.005
2	0	40	0.01
3	0	45	0.012
4	0	60	0.015

表 2 ILH 市场参数
Tab. 2 Parameters of ILH market

用户 j	可中断容量下限/MW	可中断容量上限/MW	竞标策略 b_j
5	0	20	5
6	0	40	6
7	0	40	7
8	0	60	8

表 3 容量事故场景
Tab. 3 Capacity fault scenarios

事故 m	发生概率	要求切除的总负荷容量/MW	持续时间/h
1	0.100	50	3
2	0.050	100	5
3	0.025	150	7

4.2 单一容量事故下 ILL 的最优配置

图 3 给出了针对单一容量事故, Q_I 与 C 的关系曲线, 曲线最低点的坐标值分别代表了相应的 $Q_{I,0}$ 以及 C_{\min} 。对于 $C_{h,3}$ 较大的事故 3, 所配置的 $Q_{I,0}$ 要大于 $C_{h,1}$ 较小的事故 1。表 4 给出了针对单一容量事故, 用户 1~4 的 ILL 容量和用户 5~8 的 ILH 容量优化配置结果。

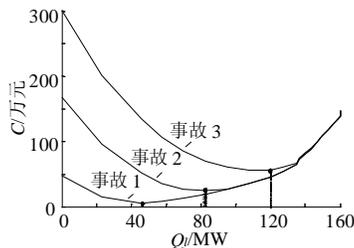


图 3 单一事故下 ILL 的最优配置

Fig. 3 Optimal configuration of ILL for the individual fault

表 4 优化结果

Tab. 4 Results of optimization

项目	事故编号	用户 1/	用户 2/	用户 3/	用户 4/	$Q_{I,0}$ /	$C_{I,0}$ /
		MW	MW	MW	MW	MW	万元
ILL	1	20	10	8.33	6.67	45	4.32
	2	20	25	20.83	16.67	82.50	19.80
	3	20	40	33.33	26.67	120	46.08

项目	事故编号	用户 5/	用户 6/	用户 7/	用户 8/	$Q_{h,0}$ /	$C_{h,m,0}$ /	C_{\min} /
		MW	MW	MW	MW	MW	万元	万元
ILH	1	1.58	1.32	1.12	0.98	5	0.47	4.79
	2	0	0	0	0	0	4.83	24.63
	3	0	0	0	0	0	9.93	56.01

4.3 ILL 优化配置决策

对于不同的容量事故, Q_I 与 C 的关系曲线的相对位置不同。为此, 在制定 $Q_{I,0}$ 优化配置决策方案时, 应考虑整个容量事故集 M 。图 1 给出了考虑多个事故情况下的联合优化配置结果, 最优决策方案为: $Q_{I,0}=130\text{MW}$, $C_{\min}=57.20$ 万元, 其中 $C_{I,0}$ 和 $C_{h,0}$ 分别为 46.08 万元和 11.12 万元。

5 结论

本文从风险管理角度出发, 基于协调优化理念对市场环境下 ILL 的配置进行了优化。ILL 最优配置问题实质上是一个风险最小化问题, 即以确定性的电费损失与风险性的停电赔偿风险之和最小为目标函数, 不但协调了市场环境下的安全性与经济性, 而且优化了 ILL 的配置。通过仿真可以得到以下结论:

(1) 为中断 ILL 与 ILH 所付出的代价具有较强的经济互补性, 从而给优化市场环境下 ILL 的最优配置留下了空间。

(2) 本文将 ILL 的电费损失与 ILH 的停电赔偿风险分别加以量化, 并以两者之和最小为目标函数, 从而通过安全性的货币化, 在优化的目标函数中统一了系统的安全性和配置的经济性。

(3) 单一容量事故下 ILL 容量的最优配置并不相同, 为此, 电网公司在制定最优 ILL 配置决策时, 应综合考虑多个容量事故情况。

(4) 本文采用代价对 Q_I 的灵敏度来指导优化 Q_I 方向的算法, 计算量少, 寻优效率高, 因而可广泛应用于工程领域。

参考文献

- 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34.
Meng Xiangxing, Han Xueshan. Discussion on reserve caused by uncertain facts[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34(in Chinese).
- 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6.
Xue Yusheng. Interactions between power market stability and power system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6(in Chinese).
- 王锡凡. 电力市场条件下电网的安全保证体系[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 7-13.
Wang Xifan. Electric network security setup in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 7-13(in Chinese).
- 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
Tan Lunnong, Zhang Baohui. Reserve capacity for accident in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 54-58(in Chinese).
- 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 电力备用市场化运营需求研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 46-50.
He Yongxiu, Huang Wenjie, Tan Zhongfu, et al. A study on demand of electricity reserve market in marketing operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 46-50(in Chinese).

- [6] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 1-6.
Xue Yusheng, Luo Yunhu, Li Bijun, et al. A review of interruptible load participating system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 1-6(in Chinese).
- [7] 王建学, 王锡凡, 张显. 电力市场中弹性运行备用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 20-27.
Wang Jianxue, Wang Xifan, Zhang Xian. The flexible operating reserve model in the power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 20-27(in Chinese).
- [8] 王乐, 余志伟, 文福栓. 基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 14-19.
Wang Le, Yu Zhiwei, Wen Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 14-19(in Chinese).
- [9] 吴集光, 刘俊勇, 牛怀平, 等. 电力市场环境最优备用容量的确定[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 10-13.
Wu Jiguang, Liu Junyong, Niu Huaiping, et al. Determination of optimal reserve capacity in electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 10-13(in Chinese).
- [10] 葛炬, 张粒子. 可中断负荷参与的备用市场的帕累托优化模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 34-37.
Ge Ju, Zhang Lizi. Pareto optimally model of reserve market including interruptible load as participants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 34-37(in Chinese).
- [11] 赖业宁, 薛禹胜, 汪德星, 等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 1-5.
Lai Yening, Xue Yusheng, Wang Dexing, et al. Risk decision-marking for reserve capacity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 1-5(in Chinese).
- [12] Tuan L A, Bhattacharya K. Competitive framework for procurement of interruptible load services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2), 889-897(in Chinese).
- [13] 孙昕, 童明光, 赵庆波, 等. 二级备用辅助服务市场中可中断负荷管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 30-33.
Sun Xin, Tong Mingguang, Zhao Qingbo, et al. A study on management model of secondary reserve for ancillary services market[J]. Proceedings of the CSSE, 2004, 24(3): 30-33(in Chinese).
- [14] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场中可中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 11-16.
Wang Jianxue, Wang Xifan, Wang Xiuli. Study on model of interruptible load contract in power market[J]. Proceedings of the CSSE, 2005, 25(9): 11-16(in Chinese).
- [15] Chen C S, Lue J T. Interruptible load control for Taiwan Power Company[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 460-465.
- [16] 王治华, 李博, 李扬. 电力市场下的可中断负荷管理及其方法[J]. 中国电力, 2003, 36(6): 14-17.
Wang Zhihua, Li Bo, Li Yang. Interruptible load management and its methods in electricity market[J]. Electric Power, 2003, 36(6): 14-17(in Chinese).
- [17] 任震, 邝新武, 黄雯莹. 电力市场中可中断电价的设计[J]. 华南理工大学学报, 2006, 34(4): 70-74.
Ren Zhen, Kuang Xinwu, Huang Wenying. Design of interruptible price in electricity market[J]. Journal of South University of Technology, 2006, 34(4): 70-74(in Chinese).
- [18] 马新顺, 文福栓, 刘建新. 构造发电公司最优报价策略的机会约束规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 35-39.
Ma Xinsun, Wen Fushuan, Liu Jianxin. A chance constrained programming based approach for building optimal bidding strategies for generation companies with risk management[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 35-39(in Chinese).

收稿日期: 2007-11-14.

作者简介:

罗运虎(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要从事变电站电气检测与故障诊断、电力需求侧管理方面的研究工作, E-mail: yhluo@nuaa.edu.cn;
邢丽冬(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事远场涡流无损检测方面的工作;

王勤(1967—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力电子与电力传动方面的研究工作。

(责任编辑 王金芝)

国家电网公司发布 1 000 kV 特高压交流架空输电线路设计标准

《1000kV 交流架空输电线路设计暂行技术规定》等 5 项技术标准已由国家电网公司发布并开始实施, 这 5 项技术标准是我国 1000kV 特高压交流架空输电线路的主要设计技术原则。这些标准由国家电网公司、中国电力工程顾问集团公司编制, 东北电力设计院、华东电力设计院、中南电力设计院、西北电力设计院、西南电力设计院、北京国电华北电力工程有限公司参加编制, 国家电网公司科技部归口管理。

1000 kV 架空输电线路在我国是新的电压等级输电线路, 属特高压输电技术。这些标准的技术原则基于国内外特高压科研成果, 参考 1000kV 晋东南—南阳—荆门交流特高压试验示范工程关键技术研究、设计研究结论及国外特高压架空输电线路已有建设和运行经验提出, 其适用性仍有待今后工程设计和工程投运后的实践检验, 并通过不断积累经验而加以完善。这些标准规定, 1000 kV 架空输电线路的设计, 除应执行本规定外, 尚应符合现行的有关国家标准和电力行业标准的规定。